

混合励磁电机的技术现状及新进展^{*}

宁银行¹, 赵朝会¹, 刘 闯²

(1. 上海电机学院 电气学院, 上海 201306;

2. 南京航空航天大学 自动化学院, 江苏 南京 210016)

摘 要: 在永磁电机的基础上, 增设电励磁绕组, 以辅助调节永磁磁场, 形成混合励磁电机, 融合了永磁电机和电励磁电机的优点, 应用前景广阔。介绍了混合励磁电机的调磁原理; 从电机原型的角度, 分析了混合励磁电机的发展思路; 以励磁方案为着眼点, 提出了一种混合励磁电机的分析方法; 结合混合励磁电机的电磁特性, 研究了混合励磁电机应用于汽车、风力发电和航空航天等领域的控制方案和系统结构; 提出了混合励磁电机技术的研究思路, 展望了混合励磁电机的发展趋势。

关键词: 同步电机; 磁通切换电机; 混合励磁电机; 拓扑结构; 汽车用电机; 风力发电机

中图分类号: TM 351 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2017)05-0001-12

Overview and New Process of Hybrid Excitation Motor^{*}

NING Yinhang¹, ZHAO Chaohui¹, LIU Chuang²

(1. School of Electric, Shanghai Dianji University, Shanghai 201306, China;

2. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: When being equipped with the field winding for adjusting the magnetic field, permanent magnet motor was changed into hybrid excitation motor (HEM), a novel motor. The HEM combined the advantage of permanent motor machine and electrically excited motor, enjoying a wide application prospect. The flux-adjusting principle of HEM was presented. In the perspective of the machine prototype, the developing strategy of HEM was analyzed. A method, focusing on the excitation structure, was proposed to understand the HEM. Basing on the electromagnetic characteristic of HEM, the control ideas and systems configurations were researched for HEM used in some areas such as automobile, wind power generation, aviation and aerospace. At the end, recommended a guiding ideology to study HEM and outlooked its developing trend.

Key words: synchronous motor; flux-switching motor; hybrid excitation motor (HEM); topology structure; automobile motor; wind power generator

0 引 言

高性能永磁材料、半导体器件和数字处理器的出现, 为永磁电机的发展提供了物质基础和技术支撑。永磁电机具有转矩密度大、损耗小、效率

高、质量轻、结构简单、运行可靠、电机形状和尺寸设计灵活等优点, 应用范围广泛, 遍及航空航天、国防、工农业生产和生活, 但磁场不可调限制了永磁电机在一些特定场合中的应用。电励磁电机磁场易于调节, 功率因数可控性好, 但励磁损耗的

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金项目(50977044); 江苏省自然科学基金项目(BK20151574); 江苏省产学研联合创新资金前瞻项目(BY2014003-09)

作者简介: 宁银行(1982—), 男, 博士研究生, 研究方向为特种电机设计与控制。

赵朝会(1963—), 男, 博士研究生, 教授, 研究方向为特种电机设计与控制。

刘 闯(1973—), 男, 博士研究生, 教授、博士生导师, 研究方向为特种电机设计与控制。

存在,一方面降低了电机效率,另一方面增大了温升过高的风险。为了融合永磁电机和电励磁的优点,同时克服两者的缺陷,引入了“混合励磁”的思想。混合励磁电机 (Hybrid Excitation Motor, HEM) 在永磁电机的基础上发展而来,通过调整永磁电机的结构,增设电励磁绕组,对永磁磁场进行辅助性调节,兼具功率密度高和磁场可调的特点,引起了学者的关注。

就时间先后上看,美国学者 F. B. Mccarty (1985 年)^[1]、俄罗斯学者 (1988 年)^[2] 和美国学者 Thomas A. Radomski (1989 年)^[3] 分别较早地提出了磁极分割式、磁分路式和爪极式等混合励磁电机,影响较为深远。此后,各国学者进行了多角度、多维度的探索。

1 HEM 的调磁原理

以 1 台三相混合励磁同步电机 (Hybrid Excitation Synchronous Motor, HESM) 为例,介绍 HEM 的调磁原理。

空载时三相绕组磁链为

$$\begin{bmatrix} \psi_{a-n} \\ \psi_{b-n} \\ \psi_{c-n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \psi_{pma-n} \\ \psi_{pmb-n} \\ \psi_{pmc-n} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_{fa} i_f \\ M_{fb} i_f \\ M_{fc} i_f \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: ψ_{pma-n} 、 ψ_{pmb-n} 、 ψ_{pmc-n} ——a、b、c 相空载永磁磁链;

M_{fa} 、 M_{fb} 、 M_{fc} ——a、b、c 相电枢绕组与励磁绕组的互感;

i_f ——励磁绕组电流。

工作在发电状态时,调节励磁电流 i_f 大小,反电势随之变化,以 a 相为例,反电势 E 为

$$E = \frac{\partial \psi_{a-n}}{\partial t} = \frac{\partial (\psi_{pma-n} + M_{fa} i_f)}{\partial t} \quad (2)$$

作为发电机使用时,根据式(2)可知,在励磁电流 i_f 为零时,永磁磁链感应出相应的初始电压,在此基础上,调节励磁电流 i_f 的大小,反电势 E 随之变化。作为电动机使用时,电机相绕组端电压 U 不小于反电势 E ,应满足:

$$|U| \geq |E| = \frac{\partial \psi_{a-n}}{\partial t} = N \Phi_\delta \omega_r \quad (3)$$

式中: N ——匝数;

Φ_δ ——气隙磁通;

ω_r ——角速度。

根据式(3)可知,工作转速满足的约束关系为

$$\omega_r \leq \frac{|U|}{N \Phi_\delta} \quad (4)$$

减小正向(或反向增大)励磁电流,可减小气隙磁通 Φ_δ ,从而可拓宽电机的转速范围。

综上所述,HEM 在发电及电动场合具有良好的应用前景。

2 HEM 的结构探索

HEM 中,用于产生主极磁场的激励源由永磁磁势和电励磁磁势构成,根据两者的耦合程度,可以分为弱耦合结构 HEM 和强耦合结构 HEM。

对于弱耦合结构 HEM,电励磁和永磁磁势相互独立,表现为磁势并列;对于强耦合结构 HEM,电励磁和永磁磁势两者耦合程度高,表现为磁势串联或磁势并联。

对于强耦合结构 HEM,根据永磁体的放置位置,可以进一步细分为定子永磁型 HEM 和转子永磁型 HEM。就目前来看,HEM 中永磁体放置的位置实际上与其电机原型密切相关,定子永磁型 HEM、转子永磁型 HEM 分别是以磁阻式双凸极电机、永磁同步电机为电机原型。

2.1 并列结构 HEM

并列式 HEM 中主磁极分别由永磁部分和电励磁部分构成,两部分在磁路上相互独立,励磁调节方便。

南京航空航天大学研究的并列式 HESM 如图 1 所示^[4]。该电机为 4 对极,转子的永磁部分为内置式切向磁路转子结构。转子的电励磁部分采用特殊的无刷结构,电励磁的所有 S 极统一沿轴向延伸成圆环状,电励磁的所有 N 极统一沿轴向延伸成另一圆环状,在两个圆环状之间设置静止的导磁桥,导磁桥一方面用作轴向磁路的导磁

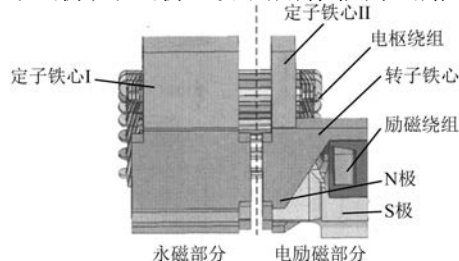


图 1 并列式 HESM(中国)

部件,另一方面在其上开槽,用于嵌放励磁绕组,可实现无刷化双向调节励磁电流。永磁部分和电励磁部分的转子同轴旋转,磁极中心线对齐,极弧系数相同。

图 2 为西门子工程师提出的一种并列式 HEM (图中未给出定子部分)^[5]。如图 2 所示,永磁部分为表贴式转子结构,电励磁部分是在电励磁爪极同步电机的基础上进行改造得到的,爪极形状改造为瓦片形状。图 2 所示的结构为一个基本单元,文献[5]中研制了多个基本单元再并列的样机。该电机的永磁部分和电励磁部分磁路仍然相互独立,结构紧凑性更高,体积进一步压缩。

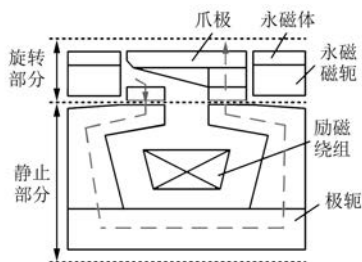


图 2 新型并列式 HEM(德国)

并列结构的 HEM 中,电励磁部分和永磁部分在磁路上相互独立,构成并列结构的组合形式灵活多样。对于永磁部分,可以是切向磁路结构,也可以是径向磁路结构。对于电励磁部分,可以是传统的转子绕线式电励磁同步电机,可以是爪极同步电机,也可以是双凸极结构的电机。表 1 给出了并列式 HEM 的几种典型组合方案。

表 1 并列式 HEM 典型组合方案

文献	电励磁部分	永磁部分
[4]	无刷结构的电励磁同步电机	切向永磁同步电机
[6-8]	传统电励磁同步电机	永磁同步电机
[9-10]	双凸极电机	切向永磁同步电机
[5,11]	爪极同步电机	永磁同步电机

2.2 定子永磁型 HEM

定子永磁型电机的代表结构包括双凸极电机、磁通反转电机和磁通切换电机等。以磁通切换电机为例,介绍定子永磁型 HEM 的发展历程。

1997 年,法国学者 Hoang 在文献[12]中提出了如图 3 所示的三相 12/10 极永磁磁通切换电机。该磁通切换电机由 C 型定子冲片拼接在一起,永磁

体位于相邻 C 型定子冲片之间,永磁体切向磁化。同一 C 型冲片两个“边”的磁通极性相同,分别源于相邻的永磁体。带载工作时,电枢磁势和永磁磁势为并联关系,永磁体退磁的风险低。

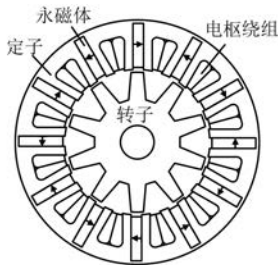


图 3 三相 12/10 极永磁磁通切换电机

2007 年,法国学者 Hoang 将“混合励磁”概念引入到永磁磁通切换电机中,提出了如图 4 所示的三相 12/10 极混合励磁磁通切换电机^[13-14]。在定子冲片外围增设铁心磁桥,通过铁心柱将定子轭和铁心磁桥连接在一起,增设的励磁绕组绕制在铁心柱上。电励磁磁势和永磁磁势为并联磁路关系,电励磁磁通路径的磁阻相对较小,有助于励磁能力的提高。

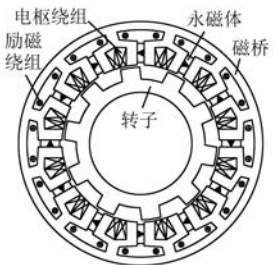


图 4 三相 12/10 极混合励磁磁通切换电机

在经典永磁磁通切换电机(图 3)的基础上,国内东南大学通过缩短永磁体,代之以励磁绕组填充其空间,在文献[15]中提出了 C 型混合励磁磁通切换电机,如图 5 所示。该结构中定子轭外围无磁桥,结构简单,但工作时,电励磁磁通经过

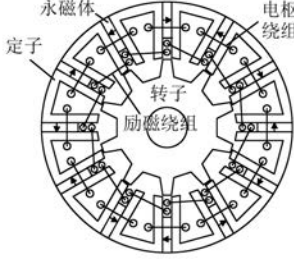


图 5 C 型混合励磁磁通切换电机

永磁体。

在经典永磁磁通切换电机(图3)的基础上,英国谢菲尔德大学诸自强教授通过增加定子齿,使“C”型定子冲片变化为“E”型定子冲片;在文献[16]中提出了E型永磁磁通切换电机,增加的中间齿不绕线圈,仅作为磁通通路。此结构有利于提高电枢绕组匝数,增大空载反电势,一方面有利于减小永磁体用量,另一方面,绕组匝数增高,电感增大,短路故障运行能力增强。为了提高气隙磁场的调节能力,诸自强教授在文献[17]中提出在(E型永磁磁通切换电机的)E型定子冲片的中间齿上绕制励磁绕组,从而得到E型混合励磁磁通切换电机,如图6所示。该电机具有相应的容错能力,但是E型定子冲片的中间齿对反电势波形的正弦度有一定影响。

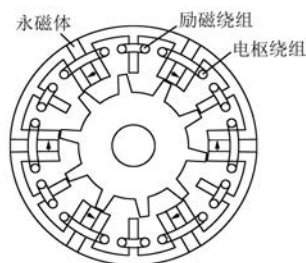


图6 E型混合励磁磁通切换电机

磁通切换电机中,绕组和永磁体位于定子侧,便于散热,且转子上既无永磁体,也无绕组,转子结构简单,机械强度高,在高速或超高速场合具有较好的应用前景。与双凸极和开关磁阻电机相比,磁通切换电机为双极性磁链,材料利用程度高,功率密度大。与传统同步电机相比,磁通切换电机的磁极极弧系数偏小,气隙磁场的利用程度稍低,电压波形质量和带载特性有待进一步改善。

2.3 转子永磁型 HEM

目前来看,转子永磁型 HEM,多以同步电机为原型。此类电机的磁极极弧系数大,功率因数易于控制,但相对而言,电机的拓扑结构复杂。

(1) 永磁磁钢的磁化类型。对于转子上的永磁体,可根据需要来设计其结构形状,并控制其充磁方向,从而形成不同类型的永磁电机。根据其磁化方向类型可以分为径向磁化、切向磁化和轴向磁化,如图7所示。在永磁电机的基础上,进行结构调整得到相应的转子永磁型 HESM(如磁钢

径向磁化型 HESM、磁钢切向磁化型 HESM 和磁钢轴向磁化型 HESM)。

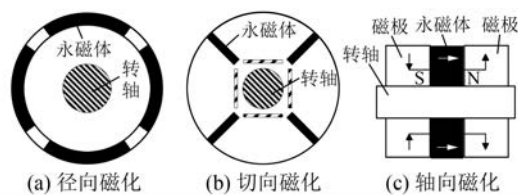


图7 永磁同步电机磁钢磁化方向类型

(2) 磁钢轴向磁化型 HESM。以磁钢轴向磁化型 HESM 为例,介绍转子永磁型 HEM 的结构特征。2010年,日本学者在文献[18]中介绍了如图8所示的HEM。环状永磁体沿轴向磁化,永磁体轴向两侧为极性相互错开的转子磁极,永磁磁通经气隙进入定子铁心。直流励磁绕组位于轴向端盖的凹槽处,为三维空间磁路。该电机中直流励磁磁势和永磁磁势是并联关系,永磁体退磁的风险小,且不需要集电环和电刷,运行可靠性高。文献[18]分析了电机的工作原理、调磁能力和损耗等,并与异步电机、永磁同步电机进行了对比性分析。文献[19]对该环形永磁体混合励磁电机的样机进行了试验,并分析了定子齿形的优化及其转子的机械应力。

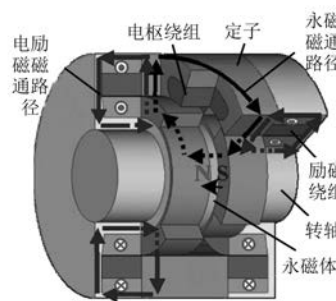


图8 环状磁钢 HEM

2006年,巴西学者在电励磁爪极电机的基础上,将电励磁绕组全部替换为轴向磁化的环形永磁体,提出了轴向磁化永磁型爪极同步电机,研究了该电机的3D电磁场分布特征^[20-21]。2010年,日本学者则在保留电励磁绕组的前提下,增加环形永磁磁钢,提出了如图9所示的HESM。文献[22]对该环形磁钢-爪极HESM的转矩密度和励磁绕组损耗进行了分析,试验表明效率达85%。

国内山东大学^[23]研究的一种轴向磁化型HEM,如图10所示。环形永磁体位于爪极转子的

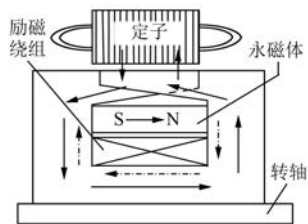


图9 环状磁钢-爪极 HESM

内腔中,为解决爪极转子内腔空间紧张的问题,将电励磁绕组放置在爪极的轴向两侧。

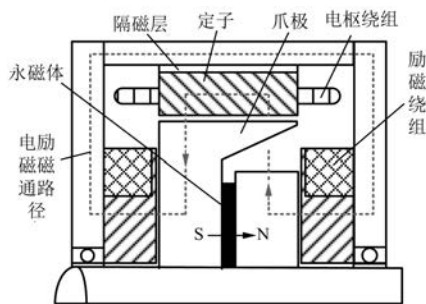


图10 新型环状磁钢-爪极 HEM

为最大限度地利用永磁电机的优点,一般而言,在采用混合励磁技术方案时,磁场激励源应以永磁为主,电励磁为辅,后者仅负责气隙磁场的辅助性调节。

3 HEM 的励磁方案

定子永磁型 HEM 中电励磁绕组和永磁体均位于定子,易于实现电励磁的无刷化,但对于以同步电机为电机原型的转子永磁型 HESM,无刷化励磁则是一个关键技术。

对于转子永磁型 HESM 而言,永磁磁钢位于转子,永磁磁钢的布置和形状不固定等,转子磁极在圆周向上交替分布,如图 11 所示。如果将相同极性的转子磁极分成一组,则转子磁极中可分成 N 磁极组和 S 磁极组,如图 11(b) 所示。经典 HEM(特指转子永磁型 HEM),其工作原理的共性部分可以概括如下:使用导磁部件将 N 磁极组和 S 磁极组分别加以延伸,并使用另一导磁部件为上述延伸部分搭建磁路,最终形成新增的附加磁路,电励磁绕组缠绕在该附加磁路上。在永磁磁场的基础上,通过控制附加磁路上的电励磁来调节磁场强度,因此该附加磁路是电励磁磁通路径的主要部分。由于导磁部件可构建的附加磁路多种多样,因此,缠绕在附加磁路上的电励磁绕组

位置也是不固定的。作者在文献[24]中仅简要提到了上述基本思想,本文结合具体案例加以丰富。以磁极分组及其附加磁路作为视角,有利于 HESM 的分析,以及启发新的拓扑结构。

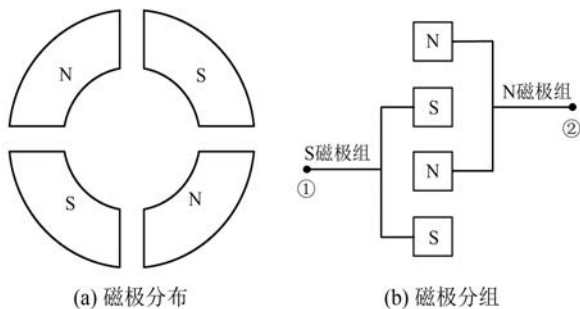


图11 同步电机转子磁极分布及分组

3.1 磁分路式

文献[25-26]介绍的磁分路式 HESM,如图 12 所示,永磁磁钢切向磁化,励磁绕组放置在(位于轴向端的)导磁桥的开槽中。该电机的磁极分组及其连接方式使用图 12(b) 表示,轴向磁路不需经过机壳,导磁桥为静止部件,电机为无刷励磁结构。磁极分组特征:N 磁极组和 S 磁极组从同侧沿轴向向外延伸。

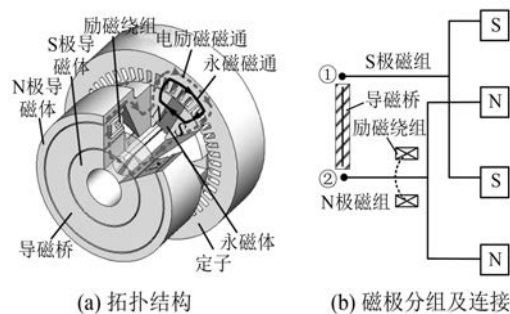


图12 磁分路型 HESM

3.2 双端调磁型

法国学者研究的双端调磁型 HESM^[27],如图 13 所示,永磁磁钢切向磁化,在轴向两端各设置一个励磁绕组。电机中电励磁磁势和永磁磁势为并联关系,系无刷励磁结构。该电机的磁极分组及其连接可使用图 13(b) 表示,磁极分组特征:N 和 S 两组磁极从不同侧的轴向端,向外延伸,再通过导磁桥、机壳与定子铁心连接起来。根据从轴向两端引出的磁极极性和永磁体的布置,衍生出几种不同类型的双端调磁型 HEM。在轴向两

端引出的磁极极性可以相同^[27-30],也可以不同^[31]。该电机磁路较长,调磁效率和漏磁等问题值得注意。

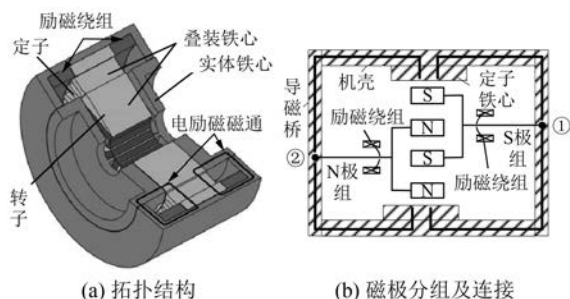


图 13 双端励磁型 HESM

3.3 爪极式

图 14 是电励磁爪极 HESM,励磁绕组位于转子内腔中。该电机的磁极分组及其连接方式可使用图 14(b)表示,系无刷励磁结构。其磁极分组特征是:N、S 两个磁极极性组从不同侧轴向端,朝转子磁极内腔收缩,并连接起来。

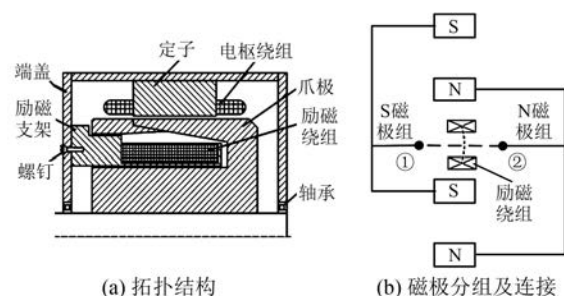


图 14 电励磁爪极 HESM

在相邻爪极之间设置切向磁化的永磁体,即构成爪极式 HESM^[3],如图 15 所示。永磁体增大了主磁通,此外,由于永磁磁阻较大,减少了电励磁在爪极间的漏磁,提高了功率密度。

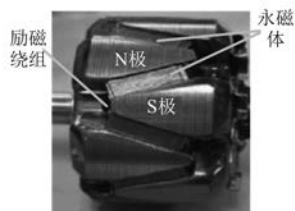


图 15 爪极 HESM

3.4 永磁-感应子式

哈尔滨工业大学研究的永磁-感应子式 HESM^[32],如图 16(a)所示。该电机由永磁和感

应子两部分构成,两者在磁路上相互独立,为并列式结构。电励磁部分为感应子式电机,励磁绕组位于静止的励磁支架上,为无刷励磁。感应子部分的磁极分组及连接方式可使用图 16(b)表示,其磁极分组特征:单一极性的磁极从轴向端的一侧,向外延伸,轴向磁路经过端盖与机壳。感应子部分的所有转子极性相同,为单极性调磁。文献[33]讨论了永磁和感应子比重对电机电感和电机性能的影响。文献[34]对感应子部分的损耗进行了分析和计算。由于感应子的转子磁极在周向上极性相同,因此,气隙磁密中包含直流偏置分量,铁损计算时应考虑损耗系数的修正。该电机的转子结构简单,适宜于高速场合。

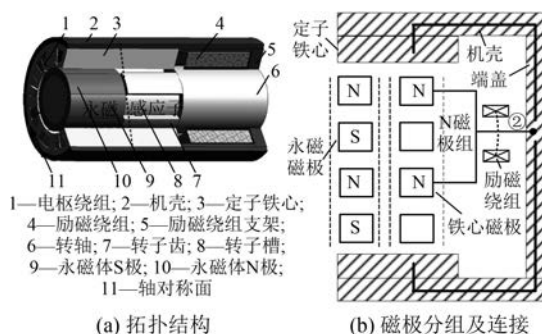


图 16 永磁-感应子式 HESM

3.5 磁极分割式

美国学者 F. B. Mccarty 在 1985 年发表的专利介绍了磁极分割式 HESM^[1],随后英国学者 E. Spooner 在 1989 年对其进行结构改进,加工了试验样机^[35-36]。美国学者 T. A. Lipo 在文献[37-38]中介绍的磁极分割式 HESM,如图 17 所示。

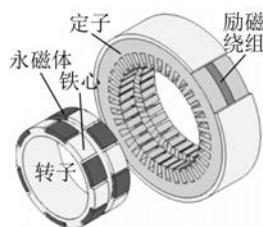


图 17 磁极分割型 HESM

磁极分割型 HESM 中包含两个独立的定子铁心,定子铁心之间固定励磁绕组,机壳采用导磁材料,作为电励磁磁路的一部分。永磁体位于转子上。转子可以看作是由两个转子磁极单元构成,每个转子磁极单元中有永磁磁极和铁心磁极,两

者交替出现。磁极分割型 HESM 可以看作是由两个电机单元的合并得到的,如图 18 所示。

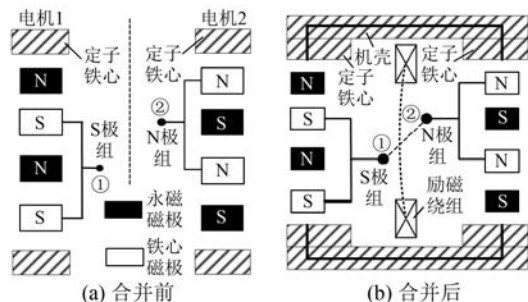


图 18 磁极分割型 HEM 磁极分组及连接

比利时及波兰学者^[39-40]研究了此类电机的转子磁极和定子齿顶形状对抑制齿槽转矩的影响。以电动汽车为应用背景,意大利学者^[41]对其转子铁心形状、永磁体形状和转矩等进行了研究。国内华中科技大学从转矩控制和效率的角度对其进行了研究^[42]。磁极分割型 HESM 中环形直流励磁线圈包围转子,因此转子外径增大,用铜量也随之增加,但该电机结构简单,无附加气隙,励磁效率高。

3.6 励磁机式

前述的磁分路式、双端励磁型、爪极式、永磁-感应子式和磁极分割型等 HESM,为实现无刷励磁,将磁极分组从轴向端引出,通过导磁部件构成相应的磁通回路,均存在轴向磁路。除上述励磁结构方案外,文献[43]借鉴航空发电机中常用的三级式方案,介绍了一种如图 19 所示的两级式无刷励磁方案,由主电机和励磁机构成,主电机采用磁路独立型 HESM,励磁机采用旋转电枢式交流发电机,励磁机电枢电能经旋转整流器整流后,为主电机励磁绕组提供励磁。

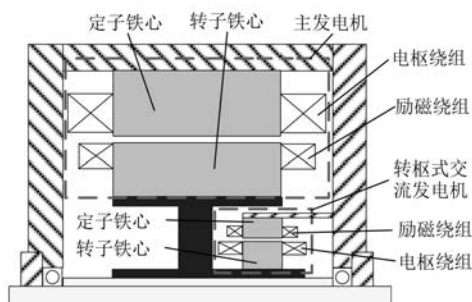


图 19 磁路独立型无刷 HESM

作为主电机的独立磁路型 HESM,在转子上

通过开槽设置空气层以实现电励磁和永磁的隔离,减弱两者的耦合程度。在一定程度上,“独立磁路型”方案可减小励磁需求。文献[44-46]对独立磁路型 HESM 的调磁原理、气隙磁密波形特征、数学模型、隔磁结构优化以及电磁-机械-热多物理场分析等问题进行了研究。

以上是 HESM 的经典励磁方案,在应用上,具有一定的普适性,应用于不同的电机原型中,可衍生出多种结构的 HEM,因此励磁结构的探索具有一定的指导意义。

4 HEM 的应用分析

4.1 汽车用驱动电机

为应对日益严峻的能源短缺和环境污染问题,燃油型汽车逐渐过渡为混合动力型、纯电动型等低排放新能源汽车。电动汽车中,驱动电机是其核心部件,要求大扭矩、大功率密度、宽调速范围、高效率、高可靠性和具有一定的容错能力。作为电动汽车驱动电机用,香港大学邹国堂教授和东南大学程明教授在文献[47]中推荐了两类 HEM(爪极型 HEM 和双凸极型 HEM)。

针对 HEM 的转矩控制,一种接受度较高的控制策略是,基于“转速分区”的电流(定子电流和励磁电流)协调控制^[48-49]。以 HESM 为例,电磁转矩 T_e 方程为

$$T_e = \frac{3}{2} p i_q [\psi_{pm} + M_{sf} i_f + (L_d - L_q) i_d] \quad (5)$$

式中: T_e ——电磁转矩;

p ——极对数;

i_q, i_d —— q, d 轴电流分量;

ψ_{pm} ——永磁磁链;

M_{sf} ——电励磁绕组与电枢绕组的互感;

i_f ——励磁绕组电流;

L_d, L_q —— d, q 轴电感。

从式(5)可以看出,当 $L_d \neq L_q$ 时,从提高转矩的角度看, i_d 不应为 0。但是 HESM 中,电励磁和永磁磁场耦合程度高,调节电励磁时,参数变化明显,因此,从这个角度看,采用 $i_d = 0$ 的控制策略,可减弱参数变化对系统稳定性的影响。

HEM 的转矩-转速特性如图 20 所示。根据电机转速 n ,将运行区间分成低速区和高速区,然后分区协调控制定子电流和励磁电流。根据负载

和转速工况,“低速区”和“高速区”又各分两个控制模式,如图 21 所示。

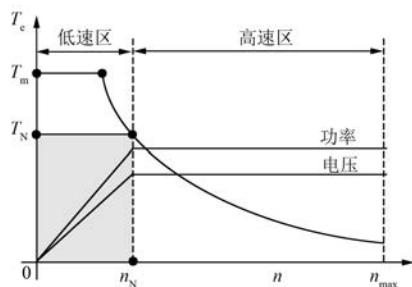


图 20 转矩-转速特性

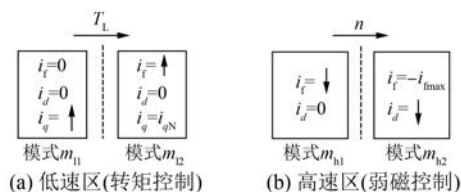


图 21 HEM 的电流分区控制

对于图 21(a),在此范围内转矩控制时,采用 $i_d=0$,遵循“先 i_q ,后 i_f ”的原则^[50-51]。以工作模式 m_{11} 为例,负载转矩 T_L 较小时,尽可能不使用励磁电流,仅通过增大定子电流 i_q ,增大电磁转矩,直到 $i_q=i_{qN}$ 。为继续增大转矩,则开始正向增大励磁电流 i_f ,进入工作模式 m_{12} ,在此期间 q 轴电流维持在额定值不变,即 $i_q=i_{qN}$ 。

对于图 21(b),转速 n 高于基速,为弱磁区。可用的弱磁物理量有 i_f 和 i_d ,本着“先 i_f ,后 i_d ”的原则进行弱磁。在工作模式 m_{21} 的转速范围内,仅启用 i_f 弱磁(此时 $i_d=0$),随着转速继续升高,直到 i_f 达到最大值,即 $i_f=-i_{fmax}$,进入到工作模式 m_{22} 中,开始起用 i_d 进行弱磁。

黄明明博士^[52]以电动汽车宽转速系统为应用背景,针对非对称交错型 HEM,建立了“转速分区”电流协调控制的驱动系统模型,与传统永磁同步电机的矢量控制系统相比,系统中增加了励磁电流控制和电流分配控制等功能模块,尤以电流协调模块最为关键,该模块根据电机转矩和转速需求,负责定子电流(i_d, i_q)以及励磁电流 i_f 的分配。比较了 3 种弱磁模式(仅 i_f ,仅 i_d, i_f+i_d)下的转速范围,零电流时,电机呈现出类似于永磁电机的特性,调速范围较窄, i_f 和 i_d 均参与弱磁时的

调速范围大大拓宽。

4.2 汽车用发电机

汽车发电机可分为直流发电机和交流发电机。由于交流发电机的相对优势,目前以交流发电机为主,内部带有二极管整流电路,将交流电整流为直流电^[53]。为满足汽车电器的用电需求,交流电机需要电压调节器,使其电压基本恒定,向蓄电池恒压供电。

图 22 所示为一种汽车电源系统^[54]。系统中有高压电池组和 12 V 电池组,发电机电压虽然可通过励磁控制器调节,但不能同时满足两种电压级别,因此,使用二极管整流电路只能为其中一个电池组充电,通常是高压电池组。12 V 电池组为起动电动机和汽车配件供电。

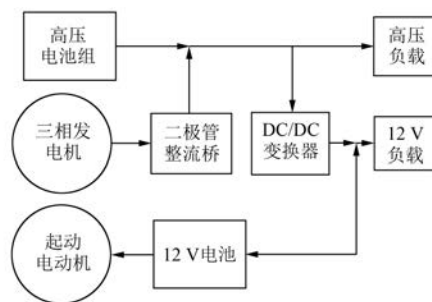


图 22 一种汽车电源系统框图

传统汽车和弱混合动力汽车中,爪极发电机应用广泛,但爪极电机存在漏磁大、输出能力小、效率低等问题。在电励磁爪极电机的爪极间镶嵌磁钢从而形成爪极 HESM,增加了主磁通,减小了爪极间漏磁。混合励磁爪极电机已逐渐成为弱混合动力汽车皮带起动发电机(Belt Starter Generator, BSG)的主流^[55]。例如,汽车零部件制造商雷米(Remy)公司和德尔福(Delphi)均采用爪极 HESM 开发了 BSG 电机,东风风神 S30 微混轿车和奇瑞 A5 试用了雷米公司的 BSG 电机。

上海大学黄苏融教授^[56]采用混合励磁型 BSG,设计了 42 V 的汽车供电系统,分析了电机的结构及原理,分别从机械、模态和热工等方面进行了综合性研究。仿真计算和试验表明,可以在宽转速范围内保持基本恒定的电压向蓄电池供电,具有输出能力强和特性硬的特点。合肥工业大学王群京教授以效率为关注点,研究了爪极 HESM^[57],相对于传统爪极电机的效率(40%~60%),混合励磁爪极电机效率有较大提高(为

55%~70%)。

4.3 风力发电机

随着能源日益枯竭以及环保意识的加强,人们逐渐认识到寻找可再生能源的迫切性,风力发电技术具有良好的发展前景,对于能源消耗大且风能资源丰富的我国,意义重大。

基于永磁电机的直驱式风力发电方案中,为了控制电机转速,实现最大风能跟踪,通常采用可控型的机侧变流器或直流侧并联 Boost 变流器等电力电子装置^[58-59],控制相对复杂。图 23 是基于 HESM 的直驱式风力发电系统^[60-61]。网侧逆变器负责将直流电能高质量地输入到电网中,确保直流侧电压的稳定,机侧变流器虽然是不控型整流器,但是可通过调节励磁电流来控制电机输出功率,进而控制转速,实现最大风能跟踪,减小了系统复杂性。

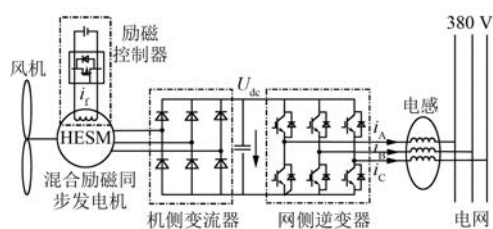


图 23 直驱式风力发电系统的原理图

上海大学阮毅教授团队采用图 23 所示的系统结构,做了不少风力发电的工作,为实现最大风能跟踪,提出了两套方案,其区别体现在网侧(逆变器)控制器和励磁控制器的输入量上。以励磁控制器的输入量为例,方案一中以直流母线电压的给定值 U_{dc}^* 和实测 U_{dc} 的偏差,作为励磁电流的控制依据^[62]。方案二中根据风速 v_w 计算出电机转速给定值 ω_r^* ,以转速给定值 ω_r^* 和实测值 ω_r 的偏差,作为励磁电流的控制依据^[63-64]。两种方案中,励磁控制器和网侧控制器相互独立性高,易于实现有功功率和无功功率的解耦,控制灵活。

4.4 航空航天用电机

空客 A380 中采用的三级式交流电机方案,由永磁同步电机、旋转电枢式交流电机和电励磁同步电机构成^[65]。永磁同步电机的容量小,为旋转电枢式交流电机提供励磁电能,旋转电枢式交流电机的交流电能经同轴旋转的整流器整流后,为电励磁同步电机提供励磁。与此方案作比较,

法国学者提出了基于 HESM 的新型方案^[65],HESM 带不控整流负载,以 270 V 直流电压为稳压目标,介绍了 HESM 和整流器的等效模型,分析了电机转速和负载变化时闭环控制系统的性能。该系统中,由于 HESM 中存在的永磁磁场,省去了三级式方案中的永磁电机;且励磁绕组位于静止部件上,进一步省去了旋转整流器,简化了系统,节省了成本^[65]。

变频交流电源是飞机电源的重要发展方向。南京航空航天大学^[66]采用 HESM 作为变频发电机,以端电压、励磁电流、工作转速和负载作为反馈量,设计了多环调压控制系统,表明系统具有良好的稳态和动态响应性能,验证了 HESM 在变频电源系统中应用的可行性。

哈尔滨工业大学^[67]以飞轮储能为应用背景,研制了由永磁电机和感应子电机组组合而成的 HESM。样机中永磁部分采用表贴式同步电机,结构简单,感应子部分励磁绕组位于轴向端静止的支架上,转子上不存在绕组,使用整块钢件制成,适用于高速运行。已有文献分别从调磁特性和带载特性^[32]、永磁/电励磁比重设计^[33]、损耗^[34]和温升计算^[68]等方面对其进行了研究。

HEM 是在传统电机的基础上发展而来,相对于其电机原型,主极磁场由单一型励磁激励源变化为多类型激励源,但是其工作原理并未发生根本性的变化,因此,基于原型电机的丰富研究成果,本着“借鉴-发展”的原则,积极稳妥地开展 HEM 的研究,有利于推进 HEM 的普及。以 HESM 为例,在永磁同步电机中广泛应用的一些先进控制策略(如磁场定向控制和直接转矩控制等)也可借鉴到 HESM 中,同时结合 HESM 的特点,改进相应的控制方案,丰富电机理论。

5 HEM 的技术发展趋势

(1) 拓扑结构的研究。相对于永磁电机,HEM 由于电励磁绕组的存在而增设了附加磁路,结构复杂性、体积大小和设备重量等有所增加,功率/体积比降低,限制了 HEM 在诸如航空航天等场合中的应用。对 HEM 进行结构优化,使其紧凑化、简单化等很有必要。

HEM 在真正实用化阶段之前,一些品质问题仍需进一步研究,例如,作为电动机时的转矩脉

动,作为交流发电机时的电压谐波。此外,电机结构的特殊性使得磁通路径变得复杂,以 HESM 为例,大多同时存在径向磁路和轴向磁路,漏磁相对突出,从拓扑结构上改善此类问题意义明显。

对于同类型的 HEM,永磁和电励磁的比重对其效率、调磁范围、带载特性和电感特性(例如 HESM 的凸极率)等影响较大。因此,以应用需求为导向设计 HEM 也是其发展方向之一。

(2) 驱动控制技术的研究。HEM 与其电机原型相比,虽然在调磁特性上有所变化,但是从运行原理上讲,仍然保持较大相似性。以 HESM 为例,与其电机原型(同步电机)相比,从电磁本质上讲, HESM 仍属于“同步电机”的范畴,因此,借鉴针对同步电机的控制技术,对于 HESM 十分必要。

针对永磁同步电机的磁场定向控制技术应用相对广泛。基速以下,可选择的转矩控制技术主要包括 $i_d=0$ 控制、最大转矩/电流比控制、最大功率控制和最小损耗控制等;基速以上,主要是弱磁扩速。与永磁电机相比, HESM 中存在专门用于控制主磁场强度的电励磁绕组,因此驱动控制技术的核心问题是综合考虑控制策略实施时的经济性和效率等因素,协调控制电励磁电流、定子直轴电流和定子交轴电流。

对于 HESM,尤其是串联或并联磁路型 HESM,电励磁和永磁磁势相互影响。例如,施加电励磁前,磁路的饱和程度主要受永磁影响,施加电励磁后,一是影响永磁磁场,二是影响磁路的饱和程度,参数变化大。电机参数的非线性增加了系统的控制精度、难度,现有研究成果大多在控制过程中假定其参数不变。因此针对 HEM 的智能控制技术是其发展方向之一。

(3) 新材料在 HEM 中的应用研究。电机损耗不仅影响电机效率,而且会引起温升的增加,温度过高是永磁性能恶化和破坏绕组绝缘系统的重要原因。对于 HEM,尤其是转子永磁型 HEM,散热差,开展 HEM 中新材料的应用研究很有必要。

超导材料在特定温度下呈现出“零电阻”特性,使用超导材料制成电机绕组,能够无损耗地传输电能。有资料表明^[69],与常规电机相比,超导电机效率提升 0.5%~0.8%,整机重量减少 1/3~1/2,长时间过载能力强(可达两倍额定容量以上的长时间过载),电抗减小,稳定性提高。

硅钢片叠片铁心,磁性能各向异性,限制了在 HESM(多存在三维磁路)中的应用。软磁复合材料(Soft Magnetic Composite, SMC)由表面绝缘的金属粉末颗粒构成,采用粉末冶金技术,磁性能各向同性,能一次成型压制成形状复杂的结构^[70]。但就目前而言,SMC 磁性能比硅钢片差,在低频情况下,SMC 的单位损耗高于普通硅钢片^[71]。鉴于硅钢片和 SMC 铁心各有优缺点,浙江大学叶云岳教授提出在横向磁通永磁电机中采用混合铁心^[72]。SMC 在电机中应用前景良好,尤其是在三维磁路的 HEM 中的应用有待进一步研究。

(4) 与应用领域相结合开展可靠性技术研究。随着研究的深入,HEM 的应用领域将进一步拓展,为使其在更多的领域发挥价值,HEM 的系统可靠性是一个亟待解决的问题。在电动汽车、航空航天和舰船推进等场合,诸如高转速、宽转速和高温湿热环境等复杂工况,涉及电磁-温度-动力学等领域,容错性和可靠性研究是其研究热点之一。

【参考文献】

- [1] MCCARTY F B. Hybrid excited generator with flux control of consequent-pole rotor: U. S. Patent: 4656379[P]. 1985.
- [2] 赵朝会,李遂亮,严仰光.混合励磁电机的研究现状及进展[J].河南农业大学学报,2004,38(4): 461-466.
- [3] RADOMSKI T A. Alternating current generator: U.S. Patent: 4959577[P]. 1989.
- [4] 张卓然,周竞捷,严仰光,等.新型并列结构混合励磁同步电机的结构与原理[J].中国电机工程学报,2009,29(33): 83-89.
- [5] BURKHARDT Y, SCHLEICHER K, KLOEPZIG M. A novel hybrid excited synchronous machine for (H) EV applications[C]// International Conference on Electrical Machines (ICEM), Berlin, 2014: 353-359.
- [6] 赵朝会,秦海鸿,姬少龙,等.并列结构混合励磁同步发电机的结构与特性研究[J].河南农业大学学报,2006,40(4): 406-409.
- [7] MALANCIUC A, SIMION A, LIVADARU L, et al. FEM-based analysis of a hybrid synchronous generator with skewed stator slots[J]. Advances in Electrical and Computer Engineering, 2011, 11(4): 9-14.

- [8] BERNATT J P, GAWRON S A. The synchronous generator with permanent magnets and excitation winding [C] // XIX International Conference on Electrical Machines (ICEM), Rome, 2010: 1-4.
- [9] 耿伟伟, 张卓然, 于立, 等. 新型并列式混合励磁无刷直流电机结构原理及其磁场调节特性 [J]. 电工技术学报, 2013, 28(11): 131-137.
- [10] GENG W W, ZHANG Z R, JIANG K, et al. A new parallel hybrid excitation machine: permanent-magnet/variable-reluctance machine with bidirectional field-regulating capability [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(3): 1372-1381.
- [11] 刘细平, 郑爱华, 王晨. 双定子混合励磁同步发电机电磁设计分析及实验研究 [J]. 电机与控制学报, 2012, 16(7): 22-28.
- [12] HOANG E, AHMED A H B, LUCIDARME J. Switching flux permanent magnet polyphased synchronous machines [C] // 7th European Conference on Power Electronic and Applications, Norway, 1997: 903-908.
- [13] HOANG E. Flux-switching dual-excitation electrical machine: 0018-9464 [P]. 2011.
- [14] HOANG E, LECRIVAIN M, GABSI M. A new structure of a switching flux synchronous polyphased machine with hybrid excitation [C] // European Conference on Power Electronics and Applications, Aalborg, 2007: 1-8.
- [15] HUA W, CHENG M, ZHANG G. A novel hybrid excitation flux-switching motor for hybrid vehicles [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45(10): 4728-4731.
- [16] CHEN J T, CHEN J T, ZHU Z Q, et al. A novel E-core flux-switching PM brushless AC machine [C] // IEEE Energy Conversion Congress & Exposition, Atlanta, Georgia, 2010: 3811-3818.
- [17] CHEN J T, ZHU Z Q, IWASAKI S, et al. A novel hybrid-excited switched-flux brushless AC Machine for EV/HEV applications [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60(4): 1365-1373.
- [18] TAKASHI K, MUTHUBABU S, MASAYOSHI Y, et al. Design studies on hybrid excitation motor for main spindle drive in machine tools [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(11): 3807-3813.
- [19] SRIDHARBABU M, KOSAKA T, MATSUI N. Design reconsiderations of high speed permanent magnet hybrid excitation motor for main spindle drive in machine tools based on experimental results of prototype machine [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2011, 47(10): 4469-4472.
- [20] NEVES C G C, RÜNCOS F, FERREIRA D L M V, et al. 3D electromagnetic simulation of a claw-pole generator [C] // International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2006: 1430-1433.
- [21] 章超, 陈栋. 轴向磁通切换混合励磁电机比较 [J]. 电机与控制应用, 2014, 41(6): 39-44.
- [22] KURODA Y, MORITA M, HAZEYAMA M, et al. Improvement of a claw pole motor using additional ferrite magnets for hybrid electric vehicles [C] // The XIX International Conference on Electrical Machines (ICEM 2010), Rome, 2010: 1-3.
- [23] 乔东伟, 王秀和, 朱常青. 环形永磁体夹置式混合励磁无刷爪极发电机的研究 [J]. 电机与控制学报, 2014, 18(5): 30-35.
- [24] 宁银行, 刘闯, 姜仁华, 等. 混合励磁同步电机的技术方案分析 [J]. 现代雷达, 2016, 38(10): 54-60.
- [25] ZHANG Z R, DAI J, DAI C, et al. Design considerations of a hybrid excitation synchronous machine with magnetic shunt rotor [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2013, 49(11): 5566-5573.
- [26] ZHANG Z R, YAN Y G, YANG S S, et al. Principle of operation and feature investigation of a new topology of hybrid excitation synchronous machine [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2008, 44(9): 2174-2180.
- [27] HLIQUI S, VIDO L, AMARA Y, et al. Magnetic equivalent circuit model of a hybrid excitation synchronous machine [J]. COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, 2008, 27(5): 1000-1015.
- [28] YACINE A, SAMI H, RACHID B, et al. Comparison of open circuit flux control capability of a series double excitation machine and a parallel double excitation machine [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60(9): 4194-4207.
- [29] AMARA Y, VIDO L, GABSI M, et al. Hybrid excitation synchronous machines: energy-efficient solution for vehicles propulsion [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(5): 2137-2149.

- [30] RITA M, GEORGES S, LIONEL V, et al. Hybrid excitation synchronous generator in embedded applications: modeling and control [J]. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2013, 90(6): 60-73.
- [31] VIDO L, AMARA Y, GABSI M, et al. Compared performances of homopolar and bipolar hybrid excitation synchronous machines [C] // 40th Annual Meeting of the IEEE-Industry-Applications-Society, Hong Kong, 2005: 1555-1560.
- [32] FU X H, ZOU J B. Numerical analysis on the magnetic field of hybrid exciting synchronous generator [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2009, 45(10): 4590-4593.
- [33] ZOU J B, FU X H. Influence of the axial-length ratio of permanent magnet to homopolar induction on the performance of hybrid excitation synchronous generator [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2011, 39(1): 368-373.
- [34] FU X H, LIN M Y, YU H T, et al. Calculation and analysis of iron loss in homopolar inductor alternator [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2012, 48(11): 3466-3469.
- [35] SPOONER E, KHATAB S A W, NICOLAOU N G. Hybrid excitation of AC and DC machines [C] // Fourth International Conference on Electrical Machines and Drives, 1989: 48-52.
- [36] 赵纪龙, 林明耀, 付兴贺, 等. 混合励磁同步电机及其控制技术综述和新进展 [J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(33): 5876-5887.
- [37] TAPIA J A, LEONARDI F, LIPO T A. Consequent-pole permanent-magnet machine with extended field-weakening capability [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2003, 39(6): 1704-1709.
- [38] TAPIA J A, LEONARDI F, LIPO T A. A design procedure for a pm machine with extended field weakening capability [C] // 37th Annual Meeting of the Industry-Applications-Society, Pittsburgh, USA, 2002: 1928-1935.
- [39] PUTEK P, SLODICKA M, PAPLICKI P, et al. Minimization of cogging torque in permanent magnet machines using the topological gradient and adjoint sensitivity in multi-objective design [J]. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 2012, 39(1): 933-940.
- [40] PUTEK P, PAPLICKI P, PALKA R. Low cogging torque design of permanent magnet machine using modified multi-level set method with total variation regularization [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2014, 50(2): 657-660.
- [41] PAOLO D B, MOGNASCHI M E, PALKA R, et al. Design optimization of a permanent-magnet excited synchronous machine for electrical automobiles [J]. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 2012, 39(1): 889-895.
- [42] LI Z R, LI Y S, LI X H. Flux control of a CPPM Machine for both a wide speed range and high efficiency [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2014, 29(9): 4866-4876.
- [43] ZHANG Q, HUANG S R, XIE G D. Design and experimental verification of hybrid excitation machine with isolated magnetic paths [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2010, 25(4): 993-1000.
- [44] 张琪, 黄苏融, 丁炬明, 等. 独立磁路混合励磁电机的多领域仿真分析 [J]. *机械工程学报*, 2010, 46(6): 8-15.
- [45] 张琪, 黄苏融, 谢国栋, 等. 独立磁路混合励磁电机的矩阵分析 [J]. *中国电机工程学报*, 2009, 29(18): 106-112.
- [46] 丁炬明, 张琪, 黄苏融, 等. 独立磁路混合励磁电机有限元分析 [J]. *电机与控制应用*, 2009, 36(8): 6-9, 28.
- [47] 邹国堂, 程明. 电动汽车的新型驱动技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.
- [48] 黄明明, 林鹤云, 金平, 等. 混合励磁同步电机驱动系统弱磁控制 [J]. *电机与控制学报*, 2012, 16(4): 8-12.
- [49] 黄明明, 林鹤云, 金平, 等. 新型混合励磁同步电机分区控制系统分析与设计 [J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32(12): 120-125.
- [50] 冯杰, 李优新, 黎勉, 等. 混合励磁同步电机低速大力矩控制策略的研究 [J]. *机械工程与自动化*, 2014, 183(2): 136-138.
- [51] 李优新. 混合励磁无刷直流电机的结构及控制策略研究 [J]. *微特电机*, 2003(3): 3-5.
- [52] 黄明明, 郭新军, 周成虎, 等. 一种新型电动汽车宽调速驱动系统设计 [J]. *电工技术学报*, 2013, 28(4): 228-233.
- [53] 郭中醒, 李国丽, 张洲, 等. 现代汽车电机技术 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2015.
- [54] 王群京, 倪有源, 李国丽. 爪极电机的结构、理论及应用 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2006.

(下转第 26 页)